

## 一种新型多芯 - 双模 - 大模场面积光纤的设计和分折\*

郑斯文<sup>1)2)†</sup> 林桢<sup>1)2)</sup> 任国斌<sup>1)2)</sup> 简水生<sup>1)2)</sup>

1) (北京交通大学, 全光网络与现代通信网教育部重点实验室, 北京 100044)

2) (北京交通大学光波技术研究所, 北京 100044)

(2012年7月23日收到; 2012年8月17日收到修改稿)

提出了一种新型双空气孔多芯 - 双模 - 大模场面积光纤结构, 计算了其模场分布、基模有效面积及弯曲损耗特性, 分析了各结构参量对其有效折射率及有效面积的影响. 这种结构在增大有效面积的同时使得二阶模的  $TE_{01}$ ,  $TM_{01}$  模截止, 实现双模传输, 基模有效面积约为  $1044 \mu\text{m}^2$ . 调整其结构参量, 甚至可以达到单模传输. 这种结构制作简单、设计灵活, 可用于高速大容量无源光纤及有源器件中. 合理设计各结构参量, 可以使有效面积达到  $3512 \mu\text{m}^2$  甚至更高, 从而满足光通信领域中大容量、高功率传输等实际应用的需求.

关键词: 多芯光纤, 双模, 大模场面积, 弯曲损耗

PACS: 42.81.-i, 42.81.Qb

DOI: 10.7498/aps.62.044224

## 1 引言

光纤传输日益增长的需求使得超高容量系统的传输容量已高达  $100 \text{Tbit/s}$ <sup>[1-3]</sup>. 为了克服光纤通信系统的容量限制, 多芯光纤 (MCF) 被用于更高功率的光纤放大器、激光器以及高速大容量光纤传输中, 有望成为下一代传输系统的光纤. 根据多芯光纤的使用目的, 我们将其大体分为两类: 低串扰型多芯光纤<sup>[4-6]</sup> 和大模场面积多芯光纤 (LMA-MCF)<sup>[7-9]</sup>. 低串扰型多芯光纤大多用于空分复用系统中<sup>[10]</sup>. 多芯光纤大多处于多模状态, 高阶模会增大光纤的传输损耗, 而大模场面积光纤要求传输损耗较小. 目前针对大模场面积多芯光纤的研究还很少.

光纤中的非线性效应是造成光纤容限的根本原因. 单模光纤中的非线性系数与有效面积成反比, 因此降低非线性效应简单有效的方式就是增加纤芯直径从而增大有效面积. 但它的缺点是会增大光纤的微弯损耗及色散. 目前制造大模场光纤的方法有: 低数值孔径的单模光纤、光子晶体光纤及

布拉格光纤等, 还有就是采用单模运转下的少模光纤 (FMF) 来增加纤芯直径而不改变损耗及色散特性<sup>[11]</sup>. 然而少模光纤存在一些缺点: 模式数目的增加导致传输损耗增大, 以及稳定性方面的隐患等. 因此, 减少少模光纤中的高阶模数目从而减小传输损耗, 在大有效面积、长距离传输方面将是亟待解决的问题.

本文针对多芯光纤分类中的第二种, 即大模场面积多芯光纤, 提出了一种基于多芯结构的双模大模场新型光纤结构. 通过合理设计光纤的各结构参量, 多芯光纤可以在减少二阶模数目的同时, 实现大模场面积传输. 这种大模场多芯光纤有望成为下一代高速大容量光纤通信系统用光纤.

## 2 多芯 - 双模 - 大模场面积光纤的结构设计

传统多芯光纤大多采用纤芯呈三角格子排列, 本文提出的多芯 - 双模 - 大模场面积光纤 (MC-DM-LMAF) 横截面结构如图 1 所示. 在传统多芯光纤上增加两个空气孔, 如图中灰色所示, 假设空气

\* 国家重点基础研究发展计划 (批准号: 2010CB328206)、国家自然科学基金 (批准号: 61178008, 61275092)、教育部科学技术研究重点项目 (批准号: 210267) 和中央高校基本科研业务费专项基金资助的课题.

† 通讯作者. E-mail: zhengsiwen010@yahoo.com.cn

孔直径与纤芯直径相等, 外包层为纯石英结构. 表征 MC-DM-LMAF 特性的结构参量有: 假定石英包层的直径为  $d_{\text{clad}} = 125 \mu\text{m}$ , 折射率为  $n_{\text{clad}} = 1.444$ , 纤芯与包层的折射率差  $\Delta = n_{\text{core}} - n_{\text{clad}}$ , 其中,  $n_{\text{core}}$  为纤芯折射率,  $\Lambda$  为芯间距,  $d$  为纤芯及空气孔直径, 这里定义参数相对孔径大小  $f = d/\Lambda$ .

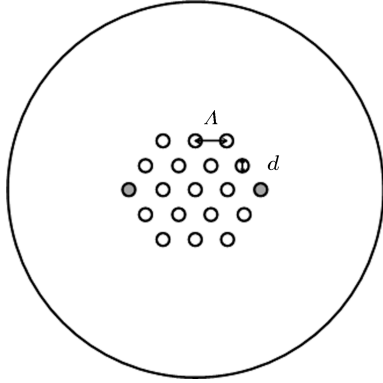


图1 双空气孔 MC-DM-LMAF 光纤横截面结构示意图

### 3 模场分布特性

由于有限元法不受计算区域内材料属性和几何形状的束缚, 具有很强的通用性, 并且建模简单, 计算速度快, 故本文采用全矢量有限元法分析 MC-FM-LMAF 的模式特性.

在 MC-DM-LMAF 中, 传输各模式的磁场强度  $\mathbf{H}$  满足亥姆霍兹方程:

$$\nabla \times (n^{-2} \nabla \times \mathbf{H}) - k_0^2 \mathbf{H} = 0, \quad (1)$$

其中,  $\mathbf{H} = \mathbf{H}(x, y) \exp(-j\beta z)$ ,  $n$  为光纤横截面的折射率分布,  $k_0$  是真空中波数,  $\beta$  为模式的传播常数. 应用有限元法可求出 (1) 式的特征向量和特征值, 即各模式磁场强度  $\mathbf{H}$  和传播常数  $\beta$ . 给定 MC-DM-LMAF 的结构参量: 纤芯与包层的折射率差  $\Delta$ , 芯间距  $\Lambda$ , 相对孔径大小  $f = d/\Lambda$ , 就能唯一确定 MC-DM-LMAF 的折射率分布, 从而就能确定波长  $\lambda$  处各模式的磁场强度  $\mathbf{H}$  和传播常数  $\beta$ .

为了研究 MC-DM-LMAF 的模场分布特性, 首先假设纤芯与包层的折射率差  $\Delta = 0.3\%$ , 芯间距  $\Lambda = 9 \mu\text{m}$ , 相对孔径大小  $f = 0.4$ , 波长  $\lambda = 1550 \text{ nm}$ , 数值计算 MC-DM-LMAF 各模式的模场分布、有效折射率  $n_{\text{eff}}$  及基模有效面积  $A_{\text{eff}}$ . 为了进行对比, 同样计算了相同结构参量的 19 芯无空气孔结构的模场分布及有效折射率  $n_{\text{eff}}$ , 即图 1 中的两空气孔替换为与其余 17 个纤芯相同的纤芯结构, 暂且称这种结构为 19 芯大模场面积光纤.

光纤中导模的模式折射率  $n_{\text{eff}}$  需满足:  $n_{\text{clad}} < n_{\text{eff}} < n_{\text{core}}$ , 折射率低于  $n_{\text{clad}}$  的模式不能在光纤中传导, 由此可以判断其截止特性. 经计算, 在未引入空气孔时, 19 芯大模场面积光纤的导模共包括 6 个模式, 即两个简并的基模:  $\text{HE}_{11-x}$ ,  $\text{HE}_{11-y}$ , 四个简并的二阶模:  $\text{TE}_{01}$ ,  $\text{TM}_{01}$  和两个  $\text{HE}_{21}$  模. 图 2 给出了这 6 个模式的模场分布和二维电矢量分布, 其中基模有效折射率  $n_{\text{eff}1} = 1.444341$ , 二阶模有效折射率  $n_{\text{eff}2} = 1.444124$ .

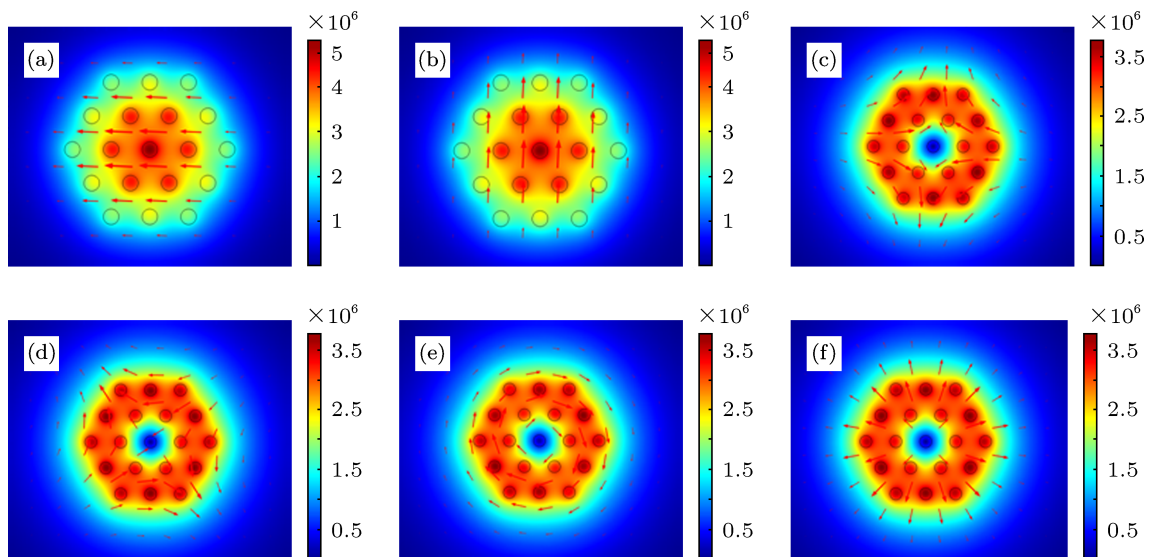


图2 19 芯结构 6 个模式的模场分布和二维电矢量分布 (a), (b) 基模  $\text{HE}_{11}$  模的两个简并模式; (c), (d)  $\text{HE}_{21}$  模; (e)  $\text{TE}_{01}$  模; (f)  $\text{TM}_{01}$  模

将 19 芯光纤最外层两个纤芯替换为空气孔, 可以达到减少高阶模数目的目的. 由于二阶模的  $TE_{01}$ ,  $TM_{01}$  模的二维电矢量分布是圆对称结构, 通过增加两个空气孔, 相当于在纤芯外侧形成了一个高阶模泄漏通道, 打破了模式的圆对称性, 增加了高阶模的泄漏损耗, 从而达到了减少模式数目的目的. 研究发现, 二阶模中的  $TE_{01}$ ,  $TM_{01}$  模截止, 光纤中传输的模式只剩下两个简并基模  $HE_{11}$  模和两个简并二阶模  $HE_{21}$  模, 因此这里定义这种光纤为严格意义上的双模光纤. 值得注意的是, 这里的双模与普通光纤的双模意义不同, 普通光纤的双模共包含有六个矢量模, 即两个简并的基模  $HE_{11}$  模, 四个简并的二阶模:  $TE_{01}$ ,  $TM_{01}$  和两个  $HE_{21}$  模, 也就是两个标量模  $LP_{01}$  和  $LP_{11}$  模. 下文中的双模光纤均为严格意义上的双模光纤, 即传输模式只有两个简并的基模  $HE_{11}$  模和两个简并的二阶模  $HE_{21}$  模.

图 3 为双空气孔 MC-DM-LMAF 中 4 个模式的模场分布和二维电矢量分布. 基模  $HE_{11}$  模  $n_{eff1} = 1.444297$ , 两个简并模式的有效折射率差  $B = |n_{eff-x} - n_{eff-y}| = 2.19 \times 10^{-7}$ , 双折射数值很小, 可以忽略不计. 二阶模  $HE_{21}$  模  $n_{eff2} = 1.444122$ ,

两简并模式的双折射  $B = |n_{eff-HE_{211}} - n_{eff-HE_{212}}| = 1.73 \times 10^{-7}$ , 同样很小忽略不计. 计算得二阶模  $TE_{01}$ ,  $TM_{01}$  模  $n_{eff3} = 1.44398 < n_{clad}$ , 说明  $TE_{01}$ ,  $TM_{01}$  模被有效地截止, 光纤中的传输模式减少为 4 个.

光纤中基模模场分布属于近高斯型分布, 其模场面积为

$$A_{eff} = \frac{[\iint_s |\mathbf{E}(x,y)|^2 dx dy]^2}{\iint_s |\mathbf{E}(x,y)|^4 dx dy}, \quad (2)$$

其中,  $\mathbf{E}(x,y)$  为基模电场分布. 计算得基模有效面积约为  $1044 \mu m^2$ , 远远大于文献 [8] 中基模有效面积的理论值  $470 \mu m^2$ .

为了研究双模和单模光纤的带宽, 考虑其有效折射率  $n_{eff}$  随波长  $\lambda$  的变化, 如图 4(a) 所示. 可见, 其双模运转范围为 1500—1930 nm, 带宽约为 430 nm, 其单模运转范围为 1930—2800 nm, 带宽约为 870 nm. 改变其结构参量, 双模和单模运转波长及带宽也会随之变化. 图 4(b) 为单模、双模运转范围随芯间距  $\Lambda$  的变化情况. 可见, 随着  $\Lambda$  的增大, 双模和单模运转波长逐渐增加, 其带宽也随之增大.

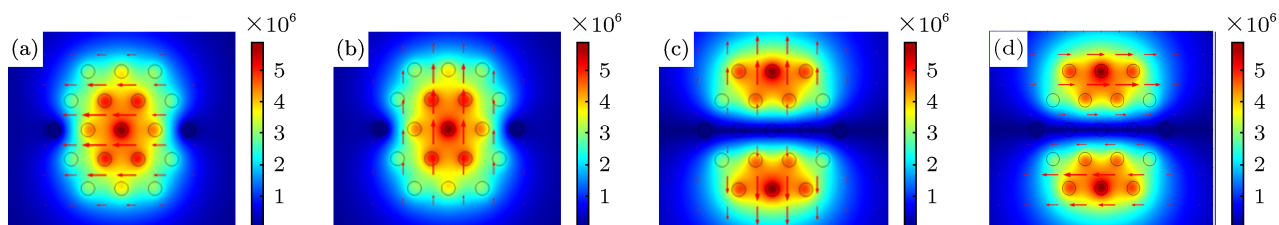


图 3 双空气孔 MC-DM-LMAF 4 个模式的模场分布和二维电矢量分布 (a), (b) 基模  $HE_{11}$  模的两个简并模式; (c), (d)  $HE_{21}$  模

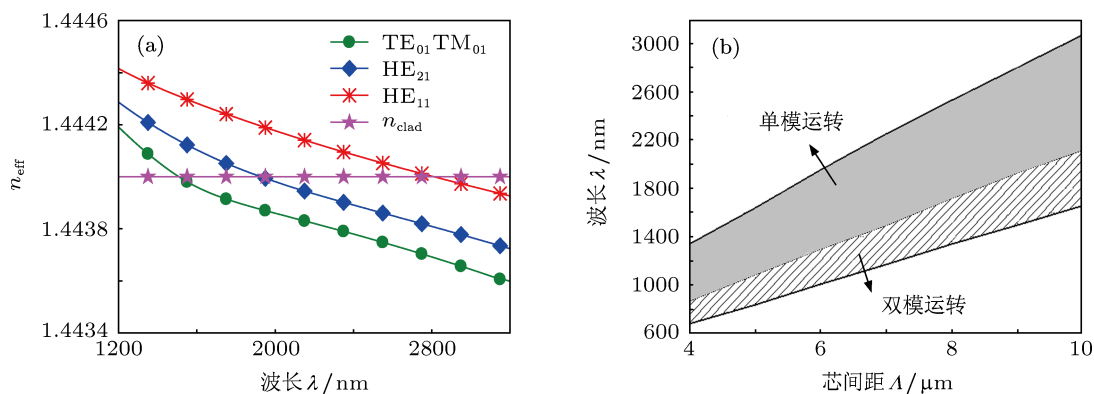


图 4 有效折射率  $n_{eff}$  随波长  $\lambda$  的变化及单模、双模运转范围 (a) 有效折射率  $n_{eff}$  随波长  $\lambda$  的变化; (b) 单模、双模运转范围随芯间距  $\Lambda$  的变化

### 4 结构参数对光纤特性的影响

用来表征 MC-DM-LMAF 的结构参量有三个: 纤芯与包层的折射率差  $\Delta$ , 芯间距  $\Lambda$ , 相对孔径大小  $f = d/\Lambda$ . 下面分别研究各参量对 MC-DM-LMAF 的有效折射率  $n_{\text{eff}}$  及基模有效面积  $A_{\text{eff}}$  的影响.

首先假设纤芯与包层的折射率差  $\Delta = 0.3\%$ , 固定相对孔径大小  $f = 0.2, 0.3, 0.4, 0.6, 0.8, 1.0$ , 研究芯间距  $\Lambda$  对 MC-DM-LMAF 有效折射率  $n_{\text{eff}}$  的影响. 计算了有效折射率  $n_{\text{eff}}$  随  $\Lambda$  的变化关系, 如图 5 所示. 可见, 在相同  $f$  时模式  $n_{\text{eff}}$  随  $\Lambda$  的增加而增大, 在相同  $\Lambda$  时  $n_{\text{eff}}$  随  $f$  的增加而增大. 在相同  $f$  和  $\Lambda$  下, 基模  $n_{\text{eff}}$  大于二阶模  $n_{\text{eff}}$ , 而二阶模  $\text{HE}_{21}$

模的  $n_{\text{eff}}$  大于二阶模  $\text{TE}_{01}, \text{TM}_{01}$  模的  $n_{\text{eff}}$ . 这与 19 芯无空气孔的结构不同, 说明合理设计  $\Lambda$  及  $f$  等参量, 可使得  $\text{TE}_{01}, \text{TM}_{01}$  模截止, 实现双模传输, 减少了二阶模数目. 随着  $\Lambda$  的进一步减小,  $\text{HE}_{21}$  模甚至也可以截止, 实现单模传输. 图中不同的  $f$  对应的  $\text{TE}_{01}, \text{TM}_{01}$  模截止时的  $\Lambda$  大小并不相同, 这说明为了减少二阶模数目, 不同的结构参量存在最佳的组合值. 不同的  $f$  对应的单模、双模传输的  $\Lambda$  值如表 1 所示. 可见随着  $f$  的增大,  $\Lambda$  值变小. 这是由于随着  $f, \Lambda$  的增大  $n_{\text{eff}}$  会增大, 为了使得  $\text{TE}_{01}, \text{TM}_{01}$  模截止, 必须使其  $n_{\text{eff}}$  小于包层折射率, 因此在增大  $f$  时需减小  $\Lambda$  的值, 以保证  $\text{TE}_{01}, \text{TM}_{01}$  模的  $n_{\text{eff}}$  始终小于包层折射率.

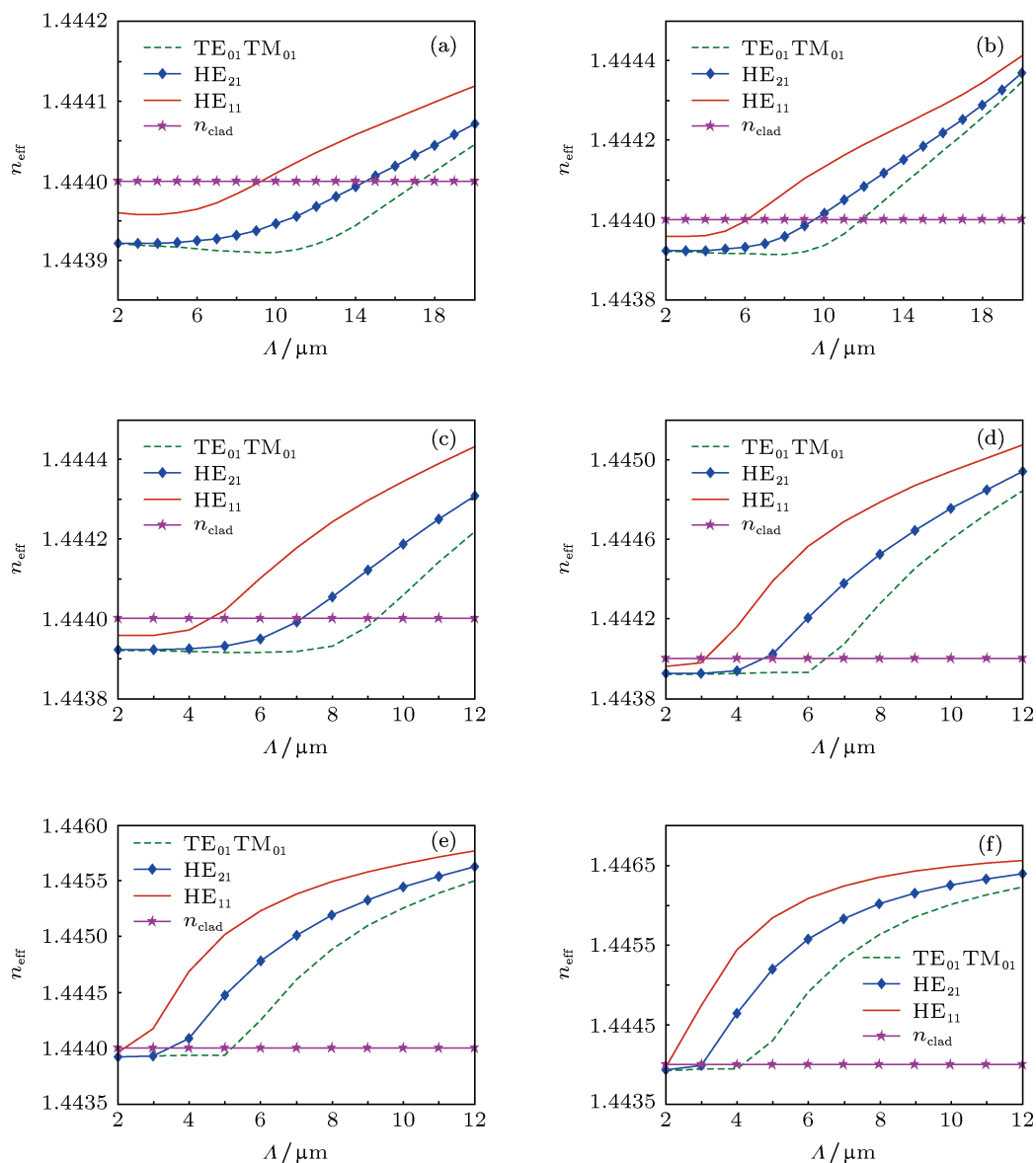


图 5 双空气孔 MC-DM-LMAF 有效折射率  $n_{\text{eff}}$  随芯间距  $\Lambda$  的变化曲线 (a)–(f) 分别表示相对孔径大小  $f = 0.2, 0.3, 0.4, 0.6, 0.8, 1.0$  时有效折射率  $n_{\text{eff}}$  随芯间距  $\Lambda$  的变化关系

表1 不同相对孔径大小  $f$  对应的最佳芯间距  $\Lambda$  值

不同 $f$ 的模式数	$f = 0.2$	$f = 0.3$	$f = 0.4$	$f = 0.6$	$f = 0.8$	$f = 1$
单模	$9.2 \leq \Lambda \leq 14.5$	$6.1 \leq \Lambda \leq 9.4$	$4.7 \leq \Lambda \leq 7.2$	$3.2 \leq \Lambda \leq 4.8$	$2.1 \leq \Lambda \leq 3.5$	$2.1 \leq \Lambda \leq 3.1$
双模	$14.5 \leq \Lambda \leq 17.2$	$9.4 \leq \Lambda \leq 11.8$	$7.2 \leq \Lambda \leq 9.2$	$4.8 \leq \Lambda \leq 6.6$	$3.5 \leq \Lambda \leq 5.2$	$3.1 \leq \Lambda \leq 4.2$

为了研究双空气孔 MC-DM-LMAF 各结构参量对基模有效面积的影响, 计算了双模传输时不同  $f$  下基模有效面积  $A_{\text{eff}}$  随芯间距  $\Lambda$  的变化曲线, 如图 6 所示. 图中不同  $f$  下基模  $A_{\text{eff}}$  随着  $\Lambda$  的增加先缓慢下降然后上升, 下降部分是由于随着  $\Lambda$  减小基模接近截止, 因而  $A_{\text{eff}}$  增大. 当基模远离截止时, 随着  $\Lambda$  增加  $A_{\text{eff}}$  增大, 且  $f$  越小  $A_{\text{eff}}$  越大. 这是由于随着  $\Lambda$  增加, 纤芯的等效尺寸增大, 从而  $A_{\text{eff}}$  增大.  $f$  越小, 说明每个纤芯的尺寸越小, 整个纤芯的等效折射率越小, 光功率更多地分布于包层中, 使得  $A_{\text{eff}}$  增大. 从图 6 中可以看出, 当  $f = 0.2, \Lambda = 17.2 \mu\text{m}$  时,  $A_{\text{eff}}$  最大, 约为  $3512 \mu\text{m}^2$ .

下面研究纤芯与包层折射率差  $\Delta$  对光纤有效折射率  $n_{\text{eff}}$  及基模有效面积  $A_{\text{eff}}$  的影响. 固定相对孔径大小  $f$  和芯间距  $\Lambda$ , 计算了三组不同  $f$  和  $\Lambda$  下,  $n_{\text{eff}}$  随  $\Delta$  的变化曲线, 如图 7 所示. 可见, 随着  $\Delta$  的增加  $n_{\text{eff}}$  逐渐增加, 并且在相同  $\Delta$  下,  $n_{\text{eff-HE}_{11}} > n_{\text{eff-HE}_{21}} > n_{\text{eff-TE}_{01}/\text{TM}_{01}}$ , 说明合理设计  $\Delta$

也能达到双模或者单模传输. 在不同  $f, \Lambda$  下,  $\text{TE}_{01}, \text{TM}_{01}$  模截止时的  $\Delta$  并不相同, 如表 2 所示. 可见随着  $f, \Lambda$  的增加  $\Delta$  变小. 这是由于随着  $f, \Lambda$  或  $\Delta$  增加  $n_{\text{eff}}$  会增大. 为了使得  $n_{\text{eff-TE}_{01}/\text{TM}_{01}} < n_{\text{clad}}$ , 在增大  $f, \Lambda$  时需减小  $\Delta$ , 以保证  $\text{TE}_{01}, \text{TM}_{01}$  模的  $n_{\text{eff}}$  始终小于包层折射率.

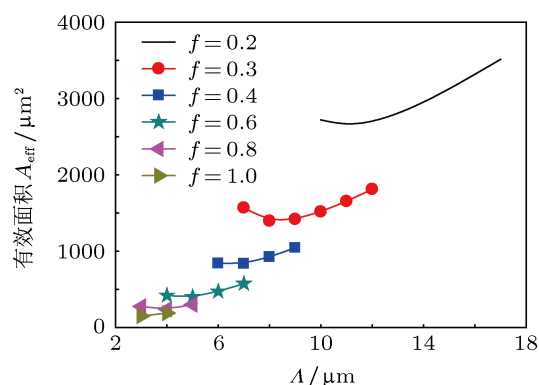


图 6 不同相对孔径大小  $f$  下基模有效面积  $A_{\text{eff}}$  随芯间距  $\Lambda$  的变化曲线

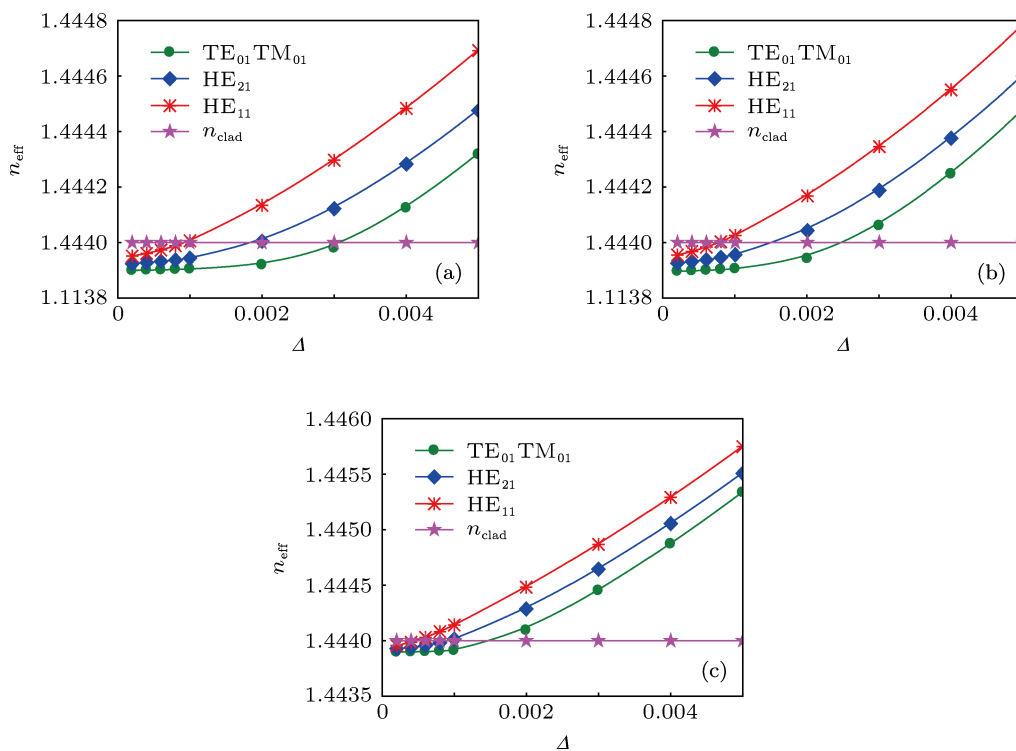


图 7 MC-DM-LMAF 有效折射率  $n_{\text{eff}}$  随纤芯与包层的折射率差  $\Delta$  的变化曲线 (a)  $f = 0.4, \Lambda = 9 \mu\text{m}$ ; (b)  $f = 0.4, \Lambda = 10 \mu\text{m}$ ; (c)  $f = 0.6, \Lambda = 9 \mu\text{m}$

表2 不同  $f, \Lambda$  对应的最佳  $\Delta$  值

不同 $f, \Lambda$ 的模式数	$f = 0.4, \Lambda = 9 \mu\text{m}$	$f = 0.4, \Lambda = 10 \mu\text{m}$	$f = 0.6, \Lambda = 9 \mu\text{m}$
单模	$0.0009 \leq \Delta \leq 0.002$	$0.0008 \leq \Delta \leq 0.0016$	$0.0005 \leq \Delta \leq 0.0009$
双模	$0.002 \leq \Delta \leq 0.0032$	$0.0016 \leq \Delta \leq 0.0026$	$0.0009 \leq \Delta \leq 0.0016$

图8分析了光纤中基模有效面积  $A_{\text{eff}}$  在不同  $f$  和  $\Lambda$  下随折射率差  $\Delta$  的变化关系. 可见, 随着  $\Delta$  的增加  $A_{\text{eff}}$  减小. 这与传统光纤是类似的, 即  $\Delta$  越大, 纤芯折射率就越大, 使得光功率较多的分布于纤芯中, 因而  $A_{\text{eff}}$  越小. 基模有效面积最高约为  $2700 \mu\text{m}^2$ . 这里只给出了三种  $f, \Lambda$  的情况, 通过合理设计  $f, \Lambda$  及  $\Delta$  的值, 基模  $A_{\text{eff}}$  可以达到更高, 满足大容量、高功率传输等实际应用的需求.

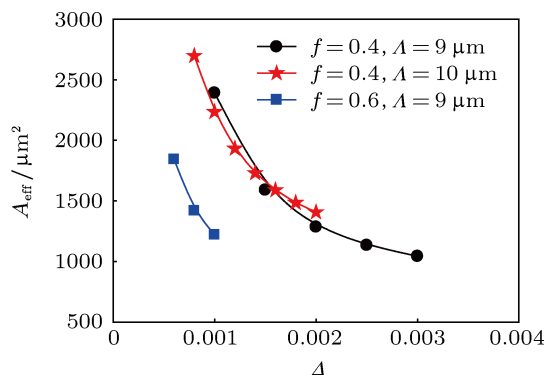


图8 不同  $f$  和  $\Lambda$  下基模有效面积  $A_{\text{eff}}$  随折射率差  $\Delta$  的变化曲线

### 5 基模弯曲损耗特性分析

当光纤发生弯曲时, 光纤形变导致的光纤几何结构及折射率差  $\Delta$  的改变, 使其传输特性受到影响. 假设光纤沿  $+x$  方向弯曲, 其横截面等效折射率分布可以表示为<sup>[12]</sup>

$$n(x, y) = n_0(x, y) \sqrt{1 + 2x/R}, \quad (3)$$

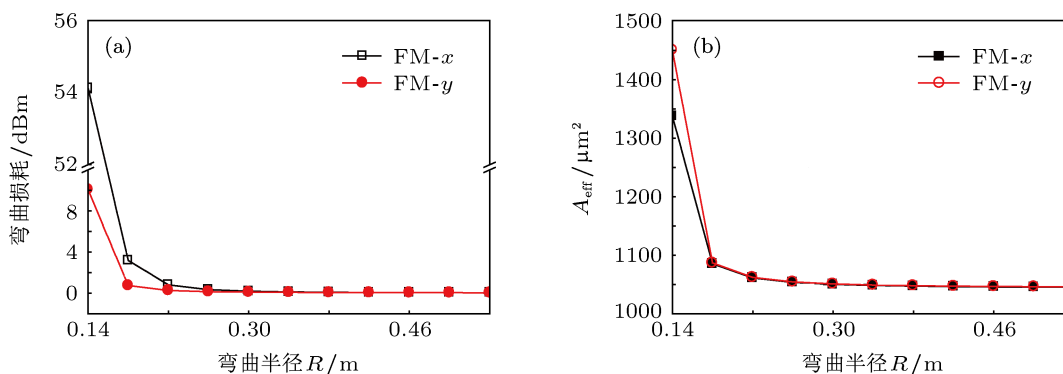


图9 (a) 光纤基模弯曲损耗; (b) 有效面积随弯曲半径的变化曲线

其中,  $n_0(x, y)$  为光纤初始折射率分布,  $R$  为光纤弯曲半径.

当光纤外层涂以低折射率涂覆层时, 常用的涂覆为低折射率环氧树脂, 其折射率为 1.36, 计算得其弯曲损耗非常小, 可以忽略不计. 说明这种光纤在实际制作中可以涂低折涂覆, 以实现大有效面积的同时减小弯曲损耗. 当光纤外层为高折射率涂覆时, 常用的是紫外固化聚合物材料, 其折射率为 1.5, 计算了不同弯曲半径下基模弯曲损耗及模场面积的变化关系, 如图9所示. 其中 FM- $x$ , FM- $y$  分别代表基模的两个偏振态. 可以看出, 随着弯曲半径的增大, 弯曲损耗及模场面积呈指数单调递减. 基模两个偏振态在弯曲半径  $R$  小于 0.2 m 时, 其弯曲损耗不同. 当  $R$  为 0.14 m 时, FM- $x$  的弯曲损耗约为 54 dB/m, 基模  $A_{\text{eff}}$  约为  $1337 \mu\text{m}^2$ , 而 FM- $y$  的弯曲损耗约为 10 dB/m, 基模  $A_{\text{eff}}$  约为  $1450 \mu\text{m}^2$ , 这是由于在  $x$  轴方向引入双空气孔的缘故. 当  $R$  为 0.2 m 时, FM- $x$  的弯曲损耗约为 1.75 dB/m, FM- $y$  的弯曲损耗约为 0.45 dB/m, 比普通阶跃型大模场光纤要小得多, 其基模  $A_{\text{eff}}$  约为  $1070 \mu\text{m}^2$ . 随着弯曲半径的增大, 当  $R$  大于 0.3 m 时, FM- $x$  与 FM- $y$  的弯曲损耗接近一致. 只要保持弯曲半径大于 0.38 m, 弯曲损耗就可以小于 0.1 dB/m, 基模  $A_{\text{eff}}$  可以保持在  $1047 \mu\text{m}^2$  左右. 对比文献 [8], 这种光纤结构的基模有效面积大大提高, 而弯曲损耗却并没有增加很多,

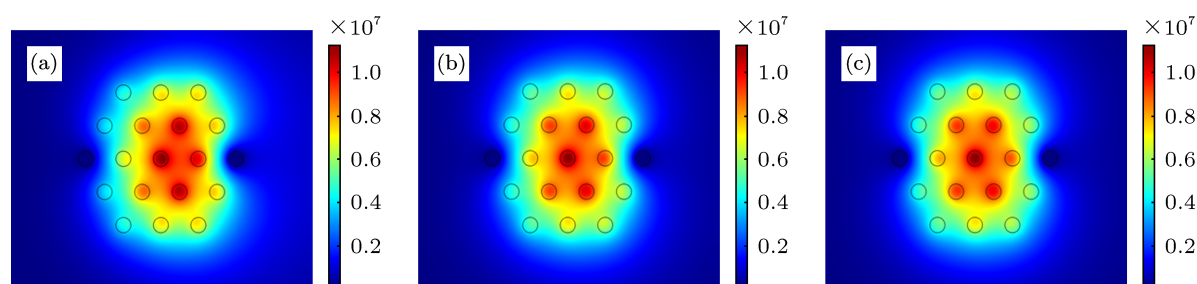


图 10 弯曲半径为 (a) 0.18 m; (b) 0.38 m; (c) 0.58 m 时的基模模场分布图

这是由于左右两侧空气孔的限制, 使光纤基模模场不易泄漏到光纤包层区域, 从而保证了光纤的大模场低弯曲损耗特性, 光纤基模模场被很好地限制在了纤芯内部。

图 10 是光纤弯曲半径为 0.18, 0.38, 0.58 m 时光纤基模  $x$  偏振态的模场分布图。随着弯曲半径的减小, 光纤形变量增大, 光纤基模模场逐渐偏离纤芯, 向包层区扩散, 使得光纤模场面积增大。

由于双空气孔的增加, 使得光纤模场形状变成类矩形, 在实际应用中若只用于大容量传输, 或与相同类型的有源光纤相连接, 其模场形状对实际应用并无影响, 只需利用保偏熔接机对准熔接即可。若与普通光纤熔接, 则应考虑损耗问题。这是由于普通光纤的模场形状大多为圆形类高斯型, 当与其熔接时模场会有不匹配的问题。

## 6 结论

本文提出了一种新型双空气孔多芯 - 双模 - 大模场面积光纤结构, 计算了其模场分布、基模有效面积及弯曲损耗特性, 分析了各结构参量对有效折射率及基模有效面积的影响。提出了一种新的定义——双模传输。研究发现, 这种结构可以在二阶模数目减少为两个的同时实现大模场面积传输, 基模有效面积约为  $1044 \mu\text{m}^2$ 。调整结构参量甚至可以达到单模传输。光纤外层涂高折涂覆时, 弯曲损耗比普通阶跃型大模场光纤要小得多。合理设计各结构参量, 可使基模有效面积达到  $3512 \mu\text{m}^2$  甚至更高, 从而满足光通信领域中大容量、高功率传输等实际应用的需求。这种光纤不需要复杂的包层结构, 只需利用光子晶体光纤的制作工艺——管棒堆积法即可, 制作方法比一般大模场光纤更简单。这种结构不仅适用于无源光纤的大容量传输, 而且可用来制作有源光纤, 用于大功率光纤放大器及激光器中。

- [1] Qian D, Huang M, Ip E, Huang Y, Shao Y, Hu J, Wang T 2011 *Optical Fiber Communication Conference (OFC)* Los Angeles, USA, March 6, 2011 pPDPB5
- [2] Akihide S, Hiroji M, Takayuki K, Masamichi F, Kengo H, Eiji Y, Yutaka M, Munehiro M, Masato M, Hiroshi Y, Yohei S, Hiroyuki I 2010 *Optical Fiber Communication Conference (OFC)* San Diego, USA, March 21, 2010 pPDPB7
- [3] Cai J X, Cai Y, Davidson C, Lucero A, Zhang H, Foursa D, Sinkin O, Patterson W, Pilipetskii A, Mohs G, Bergano N 2011 *National Fiber Optic Engineers Conference (NFOEC)* Los Angeles, USA, March 6, 2011 pPDPB4
- [4] Masanori K, Kunimasa S, Yasuo K 2009 *IEICE Electron. Express* **6** 98
- [5] Fini J M, Zhu B, Taunay T F, Yan M F 2010 *Opt. Express* **18** 15122
- [6] Tetsuya H, Toshiaki T, Osamu S, Takashi S, Eisuke S 2011 *Opt. Express* **19** 16576
- [7] Xia C, Bai N, Ozdur I, Zhou X, Li G 2011 *Opt. Express* **19** 16653
- [8] Moritz M V, Marwan A A, Andreas V, Thomas G 2009 *Opt. Lett.* **34** 2876
- [9] Fini J M 2011 *Opt. Express* **19** 4042
- [10] Zhu B, Taunay T, Fishteyn M, Liu X, Chandrasekhar S, Yan M, Fini J, Monberg E, Dimarcello F 2011 *Optical Fiber Communication Conference (OFC)* Los Angeles, USA, March 6, 2011 pPDPB7
- [11] Yaman F, Bai N, Zhu B, Wang T, Li G 2010 *Opt. Express* **18** 13250
- [12] Baggett J C, Monro T M, Furusawa K, Finazzi V, Richardson D J 2003 *Opt. Commun.* **227** 317

# Design and analysis of novel multi-core dual-mode large-mode-area optical fiber\*

Zheng Si-Wen<sup>1)2)†</sup> Lin Zhen<sup>1)2)</sup> Ren Guo-Bin<sup>1)2)</sup> Jian Shui-Sheng<sup>1)2)</sup>

1) (Key Laboratory of All Optical Network and Advanced Telecommunication Network of EMC, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China)

2) (Institute of Lightwave Technology, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China)

(Received 23 July 2012; revised manuscript received 17 August 2012)

## Abstract

A novel double air hole multi-core dual-mode large-mode-area optical fiber is proposed. The characteristics of mode field distribution, effective area of fundamental mode, and bending loss are analyzed. And the effects of all structure parameters on the effective refractive index and effective area are discussed. This structure makes  $TE_{01}$  and  $TM_{01}$  mode cut off, and it is of dual-mode transmission in the fiber. Besides, this structure can increase the effective area. The effective area of fundamental mode is approximately  $1044 \mu\text{m}^2$ . It is even able to achieve single-mode operation by adjusting the structure parameters. The fabrication of the structure is simple, and design is flexible. Therefore, it is suitable for the high-speed and large-capacity passive fibers as well as for active fibers. The effective area can reach or even exceed  $3512 \mu\text{m}^2$  by adjusting the structure parameters, in order to satisfy the practical demands of large-capacity high-power fiber transmission in the optical communications.

**Keywords:** multi-core fibers, dual mode, large mode area, bending loss

**PACS:** 42.81.-i, 42.81.Qb

**DOI:** 10.7498/aps.62.044224

---

\* Project supported by the National Basic Research Program of China (Grant No. 2010CB328206), the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 61178008, 61275092), the Key Project of Chinese Ministry of Education, China (Grant No. 210267), and the Fundamental Research Fund for the Central Universities of China.

† Corresponding author. E-mail: zhengsiwen010@yahoo.com.cn